

# Política Ótima para o Controle de Admissão de Chamadas e o Mecanismo de Adaptação de Largura de Banda em Redes Móveis Celulares

G. H.S. Carvalho, R.C. M. Rodrigues, S.V.Carvalho, C. R. L. Francês, J.C.W.A.Costa.

**Resumo**—Neste trabalho é abordado o problema da Gerência de Recursos de Rádio ótima em redes móveis celulares propondo um modelo Semi-Markoviano de Decisão que busca uma política ótima que pondera a probabilidade de bloqueio, frequência de adaptação e a satisfação do usuário. Uma análise dos resultados revela que a política encontrada obtém ótimos resultados; porém, ela apresenta um comportamento complexo dificultando sua implementação prática.

**Palavras-Chave**—Controle de Admissão de Chamadas, Adaptação de Largura de Banda, Redes Móveis Celulares, Processo Semi-Markoviano de Decisão.

**Abstract**—In the current paper we address the problem of optimal Radio Resource Management in Multimedia Cellular Mobile Networks by proposing a Semi-Markov Decision Model that seeks an optimal stationary policy that weights blocking probability, frequency adaptation, and users satisfaction. The analysis shows that the policy found obtains excellent results, but it has a complex behavior what difficult its deployment in real system.

**Keywords**—Call Admission Control, Bandwidth Adaptation, Cellular Mobile Networks, Performance Analysis, Semi-Markov Decision Process.

## I. INTRODUÇÃO

O emprego do CAC juntamente ao mecanismo de adaptação de largura de banda na confecção do esquema de alocação de canal, possibilita a provisão de serviço com garantias de QoS em redes de próxima geração. A idéia do mecanismo de adaptação de largura de banda é prover o acesso de uma nova chamada com uma qualidade de serviço inferior a solicitada durante um congestionamento por meio da redução da largura de banda das chamadas multimídia em serviço. Após o congestionamento ou ao detectar que a rede possui canais livres, a largura de banda da aplicação é promovida. A melhora obtida através desse mecanismo acarreta em um aumento na carga de sinalização, e com isso, no consumo de recursos na rede sem fio e cabeada, tão bem como um aumento na potência da bateria da estação móvel [1]. Além disso, a ânsia pelo atendimento do maior número possível de assinantes, o que é realizado através da degradação da largura de banda das aplicações já em serviço, pode causar

Glaucio Haroldo Silva de Carvalho, Carlos Renato Lisboa Francês, João Crisóstomo Weyl A. Costa, Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil, E-mails: ghsc@ufpa.br, rfrances@ufpa.br, jweyl@ufpa.br. Rita de Cássia M. Rodrigues e Solon Venâncio de Carvalho, Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, Brasil, E-mails: rita@lac.inpe.br, solon@lac.inpe.br.

uma insatisfação por parte dos usuários da Operadora de Serviço. Por fim, mas não menos importante, está o fato de que freqüentes comutações na largura de banda podem ser piores que uma grande taxa de degradação [1]. Todos esses problemas, incorridos pela utilização da adaptação da largura de banda, motivam a busca por uma política de alocação de recursos que pondere os aspectos citados acima. Nesse sentido, neste trabalho é implementado um modelo usando a teoria do Processo Semi Markoviano de Decisão (PSMD), que busca uma política ótima que minimize uma função objetivo composta pela probabilidade de bloqueio, frequência de adaptação e a insatisfação do usuário a longo prazo. Os resultados mostrarão que a política ótima consegue, a partir da ponderação dos seus objetivos, um menor custo médio quando comparado ao esquema justo [12]. Além disso, ela minimiza a frequência de adaptação, maximiza a satisfação do usuário. Contudo, esse último objetivo penaliza demais o seu desempenho fazendo com que a sua probabilidade de bloqueio seja elevada quando compara com o esquema justo. Além disso, ela apresenta um comportamento complexo dificultando sua implementação prática.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS E CONTRIBUIÇÕES

A otimalidade no mecanismo de alocação de canal adaptativo têm sido alvo de pesquisas. Quando a política de controle de admissão é estudada isoladamente, o objetivo é minimizar a probabilidade de bloqueio a longo prazo, maximizando o número de chamadas atendidas. Por outro lado, quando o CAC é analisado juntamente ao mecanismo de adaptação de largura de banda, o objetivo torna-se, além do anterior: controlar a frequência de comutação [1], satisfazer os usuários [2].

A ferramenta constantemente usada na busca pela política de alocação de recursos ótima é o Processo Semi-Markoviano de Decisão (PSMD). Sua versão discreta, processo Markoviano de Decisão (PMD), não pode ser usado, pois, os tempos entre as épocas de decisão são aleatórios [3][5]. Outros métodos são, contudo, usados como *simulating annealing* [6], programação linear inteira com variáveis 0 e 1 [2].

Em [7] e [8], os autores analisaram uma rede CDMA usando um PSMD. O primeiro trata o problema da admissão no nível da camada de rede, enquanto que o segundo, modela uma rede CDMA com restrições na probabilidade de bloqueio e na relação sinal interferência.

Em [9], os autores também utilizam o PSMD na modelagem da rede. Nesse caso, porém, a solução é obtida via

programação linear usando o método SIMPLEX. Os autores buscaram maximizar os lucros da operadora satisfazendo os parâmetros de QoS.

Em [2], os autores modelaram a alocação de recursos como um problema de programação linear inteira com variáveis 0 e 1. A solução empregada foi o procedimento de relaxação Lagrangeana. Os autores buscaram maximizar o grau de satisfação do usuário aumentando a largura de banda de sua chamada quando necessário.

Fey Yu *et al.* estudaram o problema do CAC juntamente ao mecanismo de adaptação de largura de banda através de um PSMD [1]. Contudo, a solução empregada foi o reforço de aprendizado usando uma Rede Neural. O objetivo do trabalho foi otimizar a frequência de adaptação.

Nenhum dos trabalhos citados discute, explicitamente, um modelo de alocação de recursos que busca uma política ótima que pondere a probabilidade de bloqueio, a frequência de comutação e a satisfação do usuário. Este modelo é proposto no artigo corrente através da modelagem da Gerência dos Recursos de Rádio como um processo Semi-Markoviano de Decisão. O comportamento da política derivada é estudada e comparada com o esquemas justo proposto em [12].

### III. MODELAGEM

#### A. Tráfego

A chegada das chamadas multimídia e seus pedidos de *hand off* seguem dois processos de Poisson mutuamente independentes com taxas  $\lambda_{n,c}$  e  $\lambda_{h,c}$ . Desse modo, o tráfego oferecido, é também Poissoniano com taxa  $\lambda_c = \lambda_{n,c} + \lambda_{h,c}$ . Os tempos de residência e duração de uma chamada da classe multimídia são v.a. distribuídas exponencialmente com parâmetros  $1/\mu_{h,c}$  e  $1/\mu_{d,c}$ , respectivamente. O tempo de retenção é assim v.a. exponencialmente distribuída com parâmetro  $1/\mu_c = 1/(\mu_{h,c} + \mu_{d,c})$ .

O modelo de tráfego de Internet usado é definido pelo 3GPP, o qual consiste em uma seqüência de chamadas de pacotes (*packet calls*) e tempos de leitura (*reading times*). Esse modelo de tráfego é detalhadamente descrito em [11]. A diferença entre o modelo considerado neste trabalho e o mostrado em [11] está no fato de que se considera no artigo corrente que as sessões de dados permaneçam ativas durante uma quantidade indefinida de tempo, o que em termos práticos representa a situação no qual o número de sessões é fixa [10].

#### B. Modelo Semi-Markoviano de Decisão

O PSMD é um sistema dinâmico que evolui com uma lei de probabilidade de movimento controlada por decisões que são tomadas em pontos no tempo no qual o estado do sistema é observado (épocas de decisão). Como consequência direta dessa decisão, incorre-se em um custo ou uma recompensa e em uma mudança de estado. Ao tomar uma decisão, atua-se no sistema por meio de uma ação  $a$  de um conjunto de ações disponíveis para o estado observado. Ao escolher uma ação, deve-se seguir alguma política ou regra que, *a priori*, pode apresentar qualquer comportamento. Nesse conjunto de políticas existe uma subclasse chamada de determinística e estacionária que prescreve a mesma ação  $R_i$  sempre que o

sistema está no estado  $i$  em uma época de decisão. Como o caráter Markoviano desse processo reside no fato de que o seu comportamento futuro é independente dos estados e ações passadas dado estado e a ação correntes, é intuitivo considerar somente as políticas determinísticas estacionárias [5]. Neste trabalho considerou-se um horizonte de planejamento infinitamente longo e utilizou-se como critério de otimalidade o custo médio a longo prazo.

O estado do sistema sob análise é definido pelo conjunto de valores:

$$E = \{(c, b, ev, k, m) / \begin{array}{l} 0 \leq c \leq \Theta, b \in \{0, 1\}, ev \in \{0, 1, 2\}, \\ 0 \leq k \leq B_s, 0 \leq m \leq S; \\ \text{if } b = 0, \Theta = \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil \\ \text{if } b = 1, \Theta = \lceil \frac{N}{bw_{min}} \rceil \end{array}\} \quad (1)$$

onde  $c$  é o número de chamadas multimídia em tempo real usando a largura de banda definida pelo valor de  $b$ . Isto é, se  $b = 0$  todos os clientes de serviços multimídia estão usando largura de banda máxima; caso contrário,  $b = 1$ , todos estão usando banda mínima. Assim, o sistema pode admitir um número máximo de chamadas com qualidade máxima  $\lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil$  e mínima  $\lceil \frac{N}{bw_{min}} \rceil$ .  $N$  é o número de canais de rádio disponível na célula para o escoamento do tráfego oferecido.  $ev$  é o último evento ocorrido no sistema. Para  $ev = 0$  e 1 tem-se, respectivamente, a partida e chegada de uma chamada multimídia em tempo real; para  $ev = 2$  tem-se os demais eventos, isto é, a geração e transmissão de um pacote IP e ativação e desativação de uma sessão *Web*. Essa v.a. é definida no estado do sistema para estipular o conjunto de ações em cada estado.  $k$  é o número de pacotes IP no *buffer* e  $m$  é o número de sessões ativas no sistema. A capacidade de armazenamento do *buffer* e o número máximo de sessões são dados por  $B_s$  e  $S$ . Cada estado representa a configuração do sistema logo após a ocorrência de um evento e antes da tomada de decisão.

As épocas de decisão são os instantes de chegada e partida de uma chamada multimídia em tempo real. Na chegada de uma chamada multimídia em tempo real, ( $ev = 1$ ), pode-se tomar as ações de rejeitá-la e não adaptar as chamadas em serviço ( $NN$ ); de rejeitá-la e adaptar as chamadas em serviço ( $NA$ ); de aceitá-la e não adaptar as chamadas em serviço ( $AN$ ) e de aceitá-la e adaptar as chamadas em serviço ( $AA$ ). Por outro lado, nos instantes de partida, ( $ev = 0$ ), pode-se tomar somente as ações relativas à adaptação de largura de banda das chamadas que permanecem em serviço, isto é, ( $NN$ ) e ( $NA$ ). Para os demais eventos no sistema, ( $ev = 2$ ), não se toma qualquer ação ( $NN$ ). Assim, para cada estado  $i = (c, b, ev, k, m) \in E$  define-se o seguinte conjunto de ações:

$$A(i) = \begin{cases} 0 - NN, & \forall ev \in \{0, 1, 2\}. \\ 1 - NA, & ev = 0 \wedge b = 0; \\ & \vee ev = 0 \wedge b = 1 \wedge (c \leq \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil); \\ & \vee ev = 1 \wedge (c \leq \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil). \\ 2 - AN, & ev = 1 \wedge b = 0 \wedge (c < \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil); \\ & \vee ev = 1 \wedge b = 1 \wedge (c < \lceil \frac{N}{bw_{min}} \rceil). \\ 3 - AA, & ev = 1 \wedge b = 0; \\ & \vee ev = 1 \wedge b = 1 \wedge (c < \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil). \end{cases} \quad (2)$$

Note que cada ação corresponde a um determinado número  $\in \{0, 1, 2, 3\}$ , onde a ação  $NN$  corresponde ao número 0 e assim por diante. Esse artifício matemático é feito, pois, dessa forma a tomada de decisão relativa à aceitação de uma chamada acontece sempre que o quociente da divisão inteira entre  $A(i)/2 = 1$ , caso contrário a chamada é rejeitada. Da mesma forma, a tomada de decisão relativa à adaptação de largura de banda das chamadas em serviço é dada sempre que o resto da divisão inteira  $A(i)/2 = 1$ , caso contrário, não há adaptação. Assim, o termo  $ac = 1$  será usado sempre que a ação tomada aceitar uma nova chamada, e  $ac = 0$ , caso rejeite. Do mesmo modo, o termo  $ad = 1$  será usado se a ação significar adaptação; caso contrário,  $ad = 0$ , quando não houver adaptação.

Para esse PSMD dado que o sistema está no estado  $i \in E$  e a ação  $a \in A(i)$  é tomada, tem-se: o tempo esperado até o próximo instante de decisão,  $\tau_i(a)$ ; a probabilidade de que no próximo instante de decisão o sistema esteja em  $j \in E$ ,  $p_{ij}(a)$ ; o custo esperado incorrido até o próximo instante de decisão,  $C_i(a)$ .

A partir das taxas de transição de cada estado,  $\Lambda_{ij}(a)$ , obtêm-se a taxa total de saída de cada estado dada por  $\Lambda_i(a) = \sum_{j \neq i} \Lambda_{ij}(a)$ . Onde  $\Lambda_i(a)$  é o parâmetro da distribuição exponencial negativa que descreve o tempo de permanência no estado  $i$  quando a ação  $a$  é tomada. Assim, o tempo entre as transições e as probabilidades de transição são dadas, respectivamente, por  $\tau_i(a) = 1/\Lambda_i(a)$  e  $p_{ij}(a) = \frac{\Lambda_{ij}(a)}{\Lambda_i(a)}$ .

Na Fig.(1) se apresenta o algoritmo gerador de transições do modelo de decisão. Nele, se o estado do sistema é  $i = (c, b, ev, k, m) \in E$ , então, denomina-se  $i.n$  a coordenada correspondente ao número de chamadas multimídia, e assim sucessivamente. Denominação análoga para os estados  $r$  e  $t \in E$ . Define-se como o *estado reagido a ação* ( $r \in E$ ) como aquele observado logo após a tomada da ação. O sistema permanecerá nele até que o próximo evento ocorra.

Diferente dos demais trabalhos na literatura, o modelo de decisão proposto busca uma política estacionária ótima de alocação de recursos que minimize uma função custo formada pela probabilidade de bloqueio das chamadas multimídia em tempo real, pela frequência de adaptação e pela satisfação do usuário. Para tal, usou-se uma estrutura de custo com a seguinte característica:

$$C_i(a) = C_B(i, a) + C_{AD}(i, a) + C_H(i, a) \quad (3)$$

onde  $C_B(i, a)$ ,  $C_{AD}(i, a)$  e  $C_H(i, a)$  são, respectivamente, os custos imediatos de bloqueio, adaptação e permanência em uma dada banda. Dado o número de chamadas em serviço

```

1-Início
2-Para todo  $i \in E$  e  $a \in A(i)$  faça:
3- $r \leftarrow i$ 
4-se ( $ac == 1$ ) faça  $\{r.c \leftarrow r.c + 1\}$ ;
5-se ( $ad == 1$ ) faça  $\{r.b \leftarrow 1 - r.b\}$ ;
6-// Por default faça  $r.ev \leftarrow 2$ ;
7-// Chegada de uma chamada multimídia
8- $t \leftarrow r$ 
9- $t.ev \leftarrow 1$ 
10- faça a transição  $i \rightarrow t$  com probabilidade  $\frac{\lambda_c(a)}{\Lambda_i(a)}$ ;
11-// Partida de uma chamada multimídia
12-se ( $r.c > 0$ ) faça  $\{$ ;
13-    $t \leftarrow r$ ;
14-    $t.c \leftarrow t.c - 1$ ;
15-    $t.ev \leftarrow 0$ ;
16- faça a transição  $i \rightarrow t$  com probabilidade  $\frac{r.c\mu_c}{\Lambda_i(a)}$ ;
17-//Início de uma chamada por pacotes
18-se ( $r.m < S$ ) faça  $\{$ ;
19-    $t \leftarrow r$ ;
20-    $t.m \leftarrow t.m + 1$ ;
21- faça a transição  $i \rightarrow t$  com probabilidade  $\frac{(S-r.m)\beta}{\Lambda_i(a)}$ ;
22-//Término de uma chamada por pacotes
23 se ( $r.m > 0$ ) faça  $\{$ ;
24-    $t \leftarrow r$ ;
25-    $t.m \leftarrow t.m - 1$ ;
26- faça a transição  $i \rightarrow t$  com probabilidade  $\frac{r.m\alpha}{\Lambda_i(a)}$ ;
27-// Geração do pacote IP
28-se ( $r.k < B_s \wedge r.m > 0$ ) faça  $\{$ ;
29-    $t \leftarrow r$ ;
30-    $t.k \leftarrow t.k + 1$ ;
31- faça a transição  $i \rightarrow t$  com probabilidade  $\frac{r.m\lambda_{IP}}{\Lambda_i(a)}$ ;
32- // Transmissão do pacote IP
33-se ( $r.b == 0$ ) faça  $\{band \leftarrow bw_{max}\}$ ;
34-se ( $r.b == 1$ ) faça  $\{band \leftarrow bw_{min}\}$ ;
35- $trans \leftarrow \min(N - r.cband, r.k)$ ;
36-if ( $trans > 0$ ) faça  $\{$ ;
37-    $t \leftarrow r$ ;
38-    $t.k \leftarrow t.k - 1$ ;
39- faça a transição  $i \rightarrow t$  com probabilidade  $\frac{trans\mu_s}{\Lambda_i(a)}$ ;
40-Fim
    
```

Fig. 1. Pseudo-código das transições entre os estados

imediatamente antes da tomada de decisão como  $n_{ad}$ , o estado do sistema após a tomada da ação  $a \in A(i)$  como  $i = (c, b, ev, k, m) \in E$ , as expressões para esses custos são:

$$\begin{aligned} C_B(i, a) &= c_b, \text{ se } ev = 1 \wedge a = ac = 0 \\ C_{AD}(i, a) &= c_a n_{ad}, \text{ se } ev \in \{0, 1\} \wedge a = ad = 1 \\ C_H(i, a) &= \begin{cases} C_{max} &= c_{max} c \tau_i(a), \text{ se } b = 0 \\ C_{min} &= c_{min} c \tau_i(a), \text{ se } b = 1 \end{cases} \end{aligned}$$

Note que os custos relativos ao bloqueio e a adaptação de largura de banda são fixos, enquanto que, o custo de permanência é função do tempo no qual o sistema encontra-se servindo as chamadas com banda máxima ou mínima. Além disso, os custos de adaptação e permanência são funções da

quantidade de chamadas presentes no sistema antes e depois da ação, respectivamente. Depois de definido todos os elementos pertinentes ao modelo do PSMD, pode-se utilizar o algoritmo de iteração de valores (AIV) juntamente com o método de uniformização para encontrar a política ótima [5]. A política estacionária  $R$ , definida pela regra de decisão  $f : E \rightarrow A$  prescreve a ação  $f(i) \in A(i)$  toda vez que o sistema é observado no estado  $i \in E$ .

Uma vez que a política estacionária ótima é achada usando o AIV, resolve-se a cadeia de Markov a tempo contínuo, e então com a distribuição de equilíbrio extrai-se as medidas de desempenho. O tráfego escoado no estado  $i \in E$  dado que  $ev = 1$  e a ação  $a = ac = 1 \in A(i)$  foi escolhida é

$$T_{ESC} = \sum_{\forall i \in E, ev=1, a=ac=1 \in A(i)} \Lambda_i(a) \pi_i. \quad (4)$$

Assim, a probabilidade de bloqueio de uma chamada multimídia em tempo real é

$$P_{BC} = 1 - \frac{T_{ESC}}{\lambda_c(a)}. \quad (5)$$

Como no pseudo código para a geração das transições, considere a variável  $band = bw_{max}$  se  $(b = 0)$  ou  $band = bw_{min}$  se  $(b = 1)$ . Considere ainda a variável  $trans = \min(N - cband, k)$ . De posse dessas variáveis, deriva-se a utilização dos recursos de rádio como:

$$U = bw_{max} \frac{\sum_{\forall i \in E, a \in A(i); c > 0, b=0} c \pi_i}{N} + bw_{min} \frac{\sum_{\forall i \in E, a \in A(i); c > 0, b=1} c \pi_i}{N} + \frac{\sum_{\forall i \in E, a \in A(i)} trans \pi_i}{N}. \quad (6)$$

O tráfego oferecido dos pacotes IP( $O$ ), a probabilidade de bloqueio do pacote IP ( $P_{BIP}$ ), a vazão média ( $X$ ) e o atraso médio pacotes IP ( $W_q$ ) são dados a seguir:

$$O = \lambda_{IP} \frac{\beta}{\beta + \alpha} S \quad P_{BIP} = \sum_{\forall i \in E, a \in A(i); k=B_s} \pi_i$$

$$X = O(1 - P_{BIP}). \quad W_q = \frac{\sum_{\forall i \in E, a \in A(i)} k \pi_i}{X}.$$

#### IV. RESULTADOS

Na Tabela I são mostrados os valores usados para obtenção dos resultados que serão apresentados a seguir. O esquema de alocação de recursos adaptativo ótimo será referenciado como (OT), enquanto que, o justo será chamado de (AJ). A taxa de chegada das chamadas multimídia será aumentada de 0,011 até 0,55 chamadas/s para que se estude o comportamento da política ótima mediante o aumento do tráfego. Uma fonte de 8 kbits/s será considerada na análise do serviço de dados.

A capacidade de armazenamento do *buffer* foi reduzida de modo a diminuir o tamanho do processo Markoviano. A Tabela II mostra algumas medidas que justificam essa escolha. Observe que o custo médio a longo prazo permanece praticamente

TABELA I  
PARÂMETROS USADOS NOS EXPERIMENTOS.

Parâmetros	Valor
Número de canais de rádio	20
Número de sessões <i>Web</i>	5
Tamanho do <i>buffer</i>	20
Tempo médio de duração de uma chamada da classe I(s)	120
Tempo médio de residência de uma chamada da classe I(s)	60
Tempo médio de leitura (s)	41.2
Tempo médio de serviço do pacote IP (s)	0.0375
Percentagem de <i>hand off</i> para chamadas multimídia (%)	10
Taxa média de <i>bit</i> da fonte (kbits/s)	8
Largura de banda máxima	2
Largura de banda mínima	1
Custo de bloqueio	100
Custo de adaptação	5
Custo de banda máxima	1
Custo de banda mínima	2

TABELA II  
IMPACTO DO AUMENTO DA CAPACIDADE DO *buffer* NO PSMD.

$B_s$	$C_i(a)$	Número médio de pacotes	Número de estados	Número de pares estado-ação
20	4,46128	0,156302	11.844	23.688
30	4,46128	0,167639	17.484	34.968
50	4,46128	0,177431	28.764	57.528
100	4,46129	0,182155	56.964	113.928

inalterado com o aumento do *buffer*. Além disso, o número médio de pacotes no *buffer* não cresce significativamente. Por outro lado, como mostram as últimas duas colunas dessa tabela, o PSMD aumenta consideravelmente com o aumento da capacidade do *buffer*. Contudo, o fator mais importante que será mostrado posteriormente é que política ótima não depende do comportamento do serviço de dados.

#### A. Análise da política ótima

Nesta seção será estudada a política ótima para os valores considerados na Tabela I e para a faixa de variação dos valores de tráfego. A Tabela III mostra o comportamento assumido pela política ótima, isto é, ação tomada para cada estado do processo quando o último evento é uma chegada ou partida e todos as chamadas em serviço estão com largura de banda máxima. Note que a política ótima é gulosa, pois, ela aceita a nova chamada sempre que existem recursos para tal. Além disso, ela nunca adapta a largura de banda das chamadas em serviço para a banda mínima. Isso garante a satisfação do cliente durante os momentos de congestionamento. Na partida nunca há a adaptação da largura de banda.

A Tabela IV apresenta o comportamento da política ótima quando o último evento é uma chegada de uma chamada multimídia e as chamadas em serviço estão sendo servidas com  $bw_{min}$ . Para uma carga de tráfego baixa ( $0.011 \rightarrow 0.088$  chamadas/s) a política ótima é gulosa; assim, ela aceita as novas chamadas e adapta as chamadas em serviço se possível; caso contrário, ela aceita as novas chamadas e não adapta as chamadas em serviço. Para tráfego médio ( $0.11 \rightarrow 0.176$  chamadas/s) o comportamento da política ótima pode ser dividido em duas partes: no primeiro caso, a política ótima assume um comportamento fixo sempre que o número de chamadas

em serviço é  $c < \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil$ . No caso limite,  $c = \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil$ , ela recusa uma nova chamada e adapta as chamadas em serviço para  $bw_{max}$ . No segundo caso, quando não é possível adaptar as chamadas para  $bw_{max}$ , isto é,  $c > \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil$ , nota-se que com o aumento do tráfego a política ótima começa a rejeitar as novas chamadas quando ainda é possível aceitá-las de modo a minimizar o custo médio a longo prazo. Para tráfego alto a política ótima rejeita todas as novas chamadas quando  $c \geq \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil$ . Assim, pode-se resumir o comportamento da política ótima para essa situação da seguinte forma: para tráfego baixo, médio e alto o comportamento da política ótima é fixo de forma que é possível implementá-la em um sistema real quando  $c < \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil$ . Porém, com o aumento do tráfego ele deixa de ser simples o que dificulta a sua implementação prática quando  $c \geq \lceil \frac{N}{bw_{max}} \rceil$ .

A Tabela V mostra o comportamento da política ótima quando o último evento é uma partida e todos as chamadas em serviço estão com largura de banda mínima. Esse comportamento é o mesmo para todas as faixas de tráfego citadas anteriormente. Observa-se que o sistema adapta as chamadas remanescentes no sistema sempre que possível de forma a aumentar a satisfação do usuário.

TABELA III  
COMPORTAMENTO DA POLÍTICA COM BANDA MÁXIMA.

Estado	Ação
$(c \leq 9, b = 0, ev = 1, k, m)$	AN
$(c = 10, b = 0, ev = 1, k, m)$	NN
$(0 \leq c \leq 9, b = 0, ev = 0, k, m)$	NN

TABELA IV  
COMPORTAMENTO DA POLÍTICA ÓTIMA QUANDO AS CHAMADAS ESTÃO COM BANDA MÍNIMA  $bw_{min}$ .

Tráfego	Estado	Ação	
Tráfego baixo 0.011→0.088	Comportamento fixo $(c \leq 9, b=1, ev=1, k, m)$	AA	
	$(10 \leq c \leq 19, b=1, ev=1, k, m)$	AN	
	$(c=20, b=1, ev=1, k, m)$	NN	
Tráfego médio 0.11→0.176	Comportamento fixo $(c \leq 9, b=1, ev=1, k, m)$	AA	
	$(c=10, b=1, ev=1, k, m)$	NA	
	$(c=20, b=1, ev=1, k, m)$	NN	
Tráfego médio 0.11	Comportamento dinâmico $(c=11, b=1, ev=1, k, m)$	NN	
	$(12 \leq c \leq 19, b=1, ev=1, k, m)$	AN	
	0.121	$(11 \leq c \leq 12, b=1, ev=1, k, m)$	NN
		$(13 \leq c \leq 19, b=1, ev=1, k, m)$	AN
	0.132	$(11 \leq c \leq 13, b=1, ev=1, k, m)$	NN
		$(14 \leq c \leq 19, b=1, ev=1, k, m)$	AN
	0.143	$(11 \leq c \leq 15, b=1, ev=1, k, m)$	NN
		$(16 \leq c \leq 19, b=1, ev=1, k, m)$	AN
	0.154	$(11 \leq c \leq 16, b=1, ev=1, k, m)$	NN
		$(17 \leq c \leq 19, b=1, ev=1, k, m)$	AN
	0.165	$(11 \leq c \leq 17, b=1, ev=1, k, m)$	NN
		$(18 \leq c \leq 19, b=1, ev=1, k, m)$	AN
0.176	$(11 \leq c \leq 18, b=1, ev=1, k, m)$	NN	
	$(c=19, b=1, ev=1, k, m)$	AN	
Tráfego alto 0.22→0.55	Comportamento fixo $(c \leq 9, b=1, ev=1, k, m)$	AA	
	$(c=10, b=1, ev=1, k, m)$	NA	
	$(11 \leq c \leq 20, b=1, ev=1, k, m)$	NN	

TABELA V  
COMPORTAMENTO DA POLÍTICA ÓTIMA QUANDO O ÚLTIMO EVENTO É UMA PARTIDA E OS CLIENTES ESTÃO NA BANDA MÍNIMA.

Estado	Ação
$(1 \leq c \leq 10, b = 1, ev = 0, k, m)$	NA
$(c = 0 \text{ e } 11 \leq c \leq 19, b = 1, ev = 0, k, m)$	NN

B. Análise comparativa entre a política ótima e o esquema de alocação adaptativa justa

Nesta seção o desempenho da política de alocação ótima será comparado com o do esquema justo [12]. É importante ressaltar que o objetivo da política ótima é minimizar uma função custo composta pela probabilidade de bloqueio, frequência de adaptação e satisfação do usuário. A Fig.(2.a) mostra o custo médio para os dois esquemas de alocação de recurso. Note que o esquema justo onera mais o sistema que a política ótima. A Fig.(2.b) destaca a redução desse custo médio, calculado como  $\frac{C_i^{AJ} - C_i(a)}{C_i^{AJ}} \times 100$ , obtido pela política ótima. Note que ela chega a alcançar 22,59 % durante momentos de congestionamento. A Fig.(2.c) mostra uma comparação entre os custos médio de adaptação para ambos esquemas. Novamente é possível observar a superioridade da política ótima sobre o esquema justo principalmente para médio e alto tráfego. A Fig.(2.d) mostra que a probabilidade de bloqueio do esquema justo é inferior a da política ótima. Isso acontece, pois, a política ótima tenta a todo momento satisfazer o usuário. Isso significa atribuir e manter a largura de banda máxima mesmo durante os momentos de congestionamento. Assim, com um número maior de chamadas com a banda máxima, menor é a disponibilidade de recursos para as novas solicitações por serviço e, conseqüentemente, maior a probabilidade de bloqueio. Por outro lado, a Fig.(3.a) revela que a utilização dos recursos de rádio do esquema que emprega a política ótima é superior a do justo. A Fig.(3.b) ratifica essa informação destacando a diferença percentual entre essas utilizações. Nela se observa que o esquema justo consegue manter a mesma utilização para tráfego baixo, e uma superficial superioridade para uma parte do tráfego médio. Porém, com o aumento do tráfego, a política ótima mostra-se novamente superior chegando a melhorar a utilização dos recursos de rádio em quase 13 %. A Fig.(3.c) destaca a utilização da largura de banda devido ao escoamento do tráfego multimídia em tempo real com banda máxima e mínima, e o escoamento do tráfego IP; observa-se que a política ótima mantém a largura de banda máxima durante todo o experimento, e como dito anteriormente, a maior utilização, enquanto que, o esquema justo somente segue o desempenho da política ótima sob uma carga de tráfego média. Para valores de tráfego alto, a maior parte das chamadas é servida com banda mínima. A Fig.(3.d) mostra o desempenho do serviço de dados sob a política ótima e justa. Note que o preço a ser pago pela satisfação dos clientes mantendo a banda máxima sempre que possível, também se reflete no desempenho desse serviço. Assim, o esquema justo consegue escoar mais rapidamente o tráfego Web. Contudo, os valores médios do atraso assumidos pela política ótima não são abusivos.

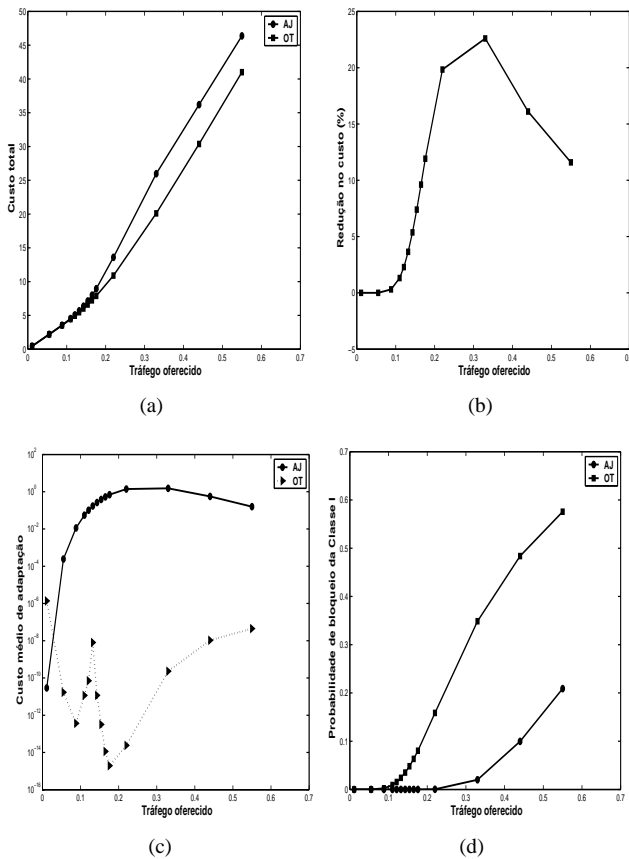


Fig. 2. Custos médios: (a) Total (b) Redução no Custo médio a longo prazo por unidade de tempo (c) Custo médio de adaptação (d) Probabilidade de bloqueio de uma chamada multimídia em tempo real.

### V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi estudado uma política ótima para Gerência dos Recursos de Rádio que pondera a probabilidade de bloqueio, a frequência de adaptação de largura de banda e a satisfação do usuário. Para os valores considerados nos experimentos, verificou-se que, ela consegue controlar a frequência de adaptação reduzindo bastante a comutação entre os níveis de largura de banda. Além disso, ela tenta manter a satisfação do cliente a todo momento. Por outro lado, por causa desse último fator, ela apresenta uma probabilidade de bloqueio um pouco elevada quando comparado ao esquema justo.

Devido a sua complexidade de implementação em sistemas reais a política ótima deve servir como meta para o cálculo de políticas sub-ótimas de fácil implementação. Essas serão tema dos próximos trabalhos.

### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo CPNq.

### REFERÊNCIAS

[1] F. Yu, V. W.S Wong e V. C.M. Leung, *A new QoS provisioning method for adaptive multimedia in cellula wireless networks*, in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2004*, 2004.  
 [2] K.-Min Ahn e S. Kim. *Optimal bandwidth allocation for bandwidth adaptation in wireless multimedia networks*, *Computers & Operations Research*, vol. 30, no. 13, Novembro, 2003, pp. 1917–1929.

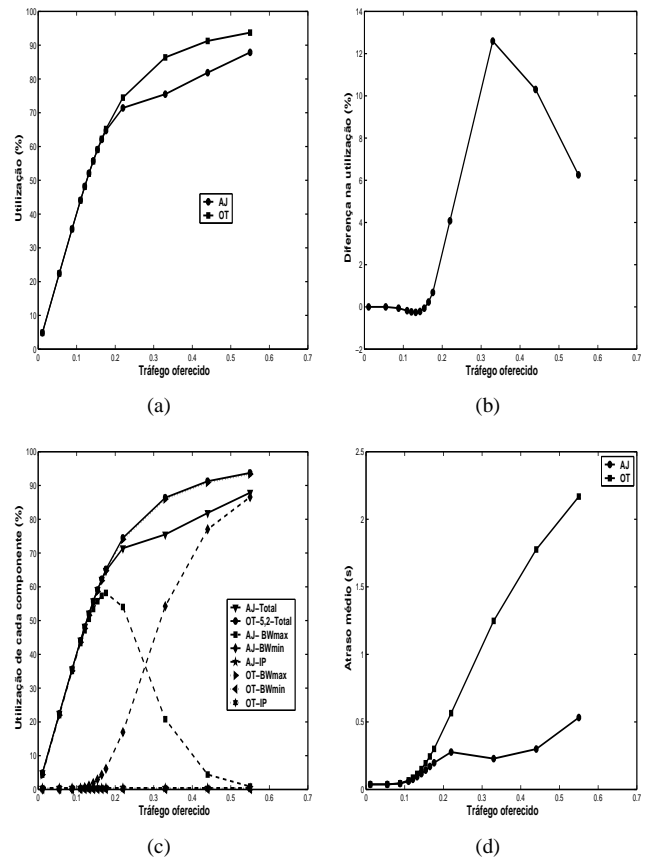


Fig. 3. (a) Utilização (%), (b) Melhora na Utilização (%) (c) Utilização devido a cada componente (%) (d) Atraso médio.

[3] S. M. Ross. *Applied Probability Models With Optimization Applications*, Dover Publications, 1992.  
 [4] L. Martin Puterman. *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. John Wiley & Sons, 1994.  
 [5] H. C. Tijms. *Stochastic models: an algorithmic approach*, John Wiley & Sons, 1994.  
 [6] G.V. Zaruba, I. Chlamtac e S.K. Das. *A prioritized real time wireless call degradation framework for optimal call mix selection*. *Mobile Networks and Applications*, vol. 7, Abril, 2002, pp. 143–151.  
 [7] E. Geraniotis e W.-B. Yang. *Admission policies for integrated voice and data traffic in CDMA packet radio networks*, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 12, no. 4, Maio, 1994 pp. 654–664.  
 [8] S. Singh, V. Krishnamurthy e H.V.Poor. *Integrated voice/data call admission control for wireless DS-SS-SSMA systems*. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 6, Junho, 2002 pp. 1483 - 1495  
 [9] Y. Xiao, C.L.P. Chen e Y. Wang. *An optimal distributed call admission control for adaptive multimedia in wireless/mobile networks*, *Proceedings 8th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems*, 2000, pp. 477– 482.  
 [10] M.Meo e M. A. Marsan. *Resource management policies in GPRS systems*, *Performance Evaluation*, Vol. 56, no. 1-4, Março, 2004, pp. 73-92.  
 [11] G. H. S. Carvalho, J. C. W. A. Costa, C. R. L. Frânces, R. C. M. Rodrigues, S. V.Carvalho, *Alocação de Recursos em Redes Móveis Celulares Hierárquicas GSM/GPRS*, *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, 2004, Belém, Pará.  
 [12] G. H. S. Carvalho, J. C. W. A. Costa, C. R. L. Frânces, R. C. M. Rodrigues, S. V.Carvalho, *Controle de Admissão de Chamadas em Redes Móveis Celulares Adaptativas*, *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações* (Submetido), 2005, Campinas, São Paulo.